الفصل السادس

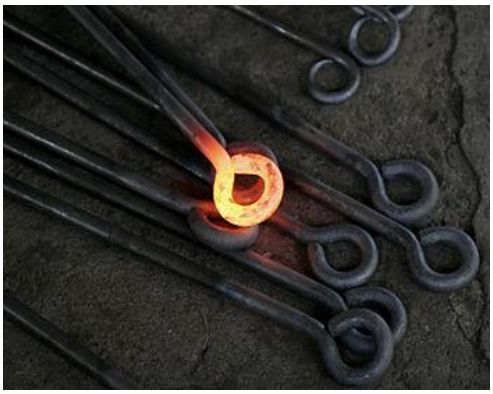
التأثير الكهروضوئي

Physics Genius

إعداد : عبقري الفيزياء

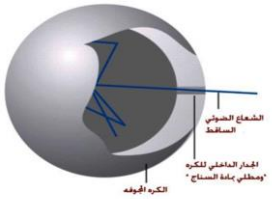
◄ تكميم الطاقة

● **منحنى إشعاع الجسم الأسود المثالي :**

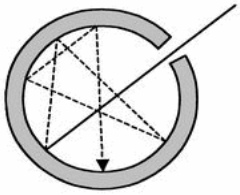


عند تسخين قضيب من الحديد فإننا نجد أن الإشعاع المنبعث منه يتغير كلما ارتفعت درجة حراراته , هكذا فإن الأجسام الساخنة تشع موجات كهرومغناطيسية وتختلف شدة الإشعاع المنبعث عنها باختلاف الطول الموجي الذي يتغير بتغير درجة الحرارة .

ويختلف نوع الإشعاع المنبعث من الأجسام المتوهجة على الإشعاع الذي قامت بامتصاصه ' أي أن الجسم المشع يقوم بامتصاص الأشعة الساقطة عليه وإذا ما ارتفعت درجة حرارته فإنه يقوم بإطلاق هذه الأشعة التي قام بامتصاصها , ويطلق على الجسم الذي يمتص جميع الأشعة الساقطة عليه ولا يعكس منها شيئاً وإذا ما تم تسخينه فإنه يطلق جميع هذه الأشعة بالجسم الأسود المثالي ويسمى الإشعاع المنبعث عنه بإشعاع الجسم الأسود.

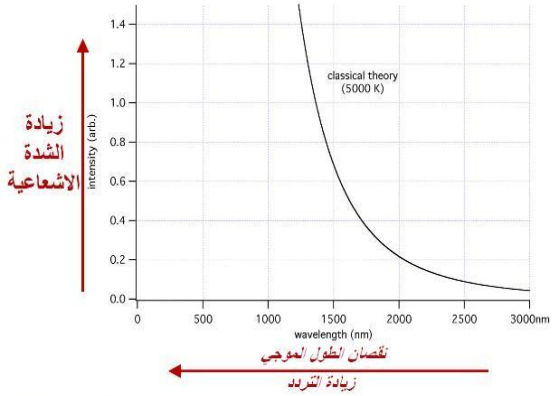


ويمكن تشبيه الجسم الأسود بكره مجوفة بها ثقب صغير يدخل منه الإشعاع وإذا ما نظرنا بداخل هذا التجويف من خلال الثقب فإن كل ما بداخله يبدو أسود , وذلك نتيجة الانعكاسات العديدة للشعاع داخل تجويف الكرة . أما إذا ما سخنت المرة فإن الإشعاعات بكل الأطوال الموجية التي قامت بامتصاصها من خلال الثقب ستنبعث عنه وبالتالي فإن هذه الكرة يطلق عليها جسم ممتص مثالي ومشع مثالي .



وقد قام العلماء بدراسة العلاقة بين شدة إشعاع الجسم الأسود المثالي والطول الموجي لشدة الإشعاع عند درجات حرارة مختلفة وقاموا بتمثيل هذه العلاقة في منحنى يعرف بإسم (منحنى إشعاع الجسم الأسود) , وقد كانت توقعات العلماء لهذا المنحنى وذلك بالاعتماد على النظرية الموجية كما يلي :

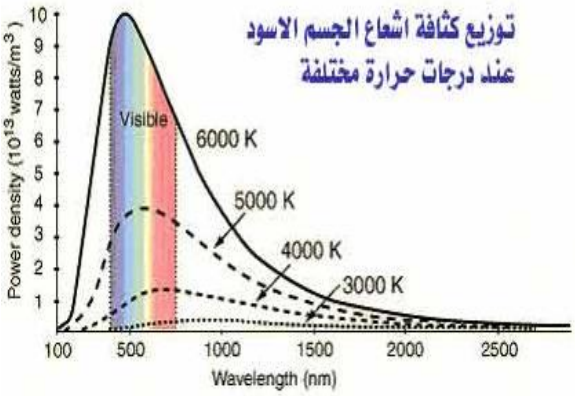
المنحنى حسب توقعات النظرية الموجية



- يعتمد تردد الإشعاع المنبعث على تردد جزيئات الجسم المشع .
- بزيادة درجة حرارة الجسم المشع يزداد تردد الجزيئات وبالتالي يزداد تردد الإشعاع المنبعث منه ويقل الطول الموجي .
- يمكن للجسم المهتز أن يبعث موجات كهرومغناطيسية (إشعاع) عند جميع الترددد والأطوال الموجية الممكنة وبصورة مستمرة .
- كلما اقترب الطول الموجي من الصفر فإن شدة الإشعاع المنبعث من الجسم الساخن تقترب من ما لانهاية .

* النتائج التي حصل عليها العلماء :

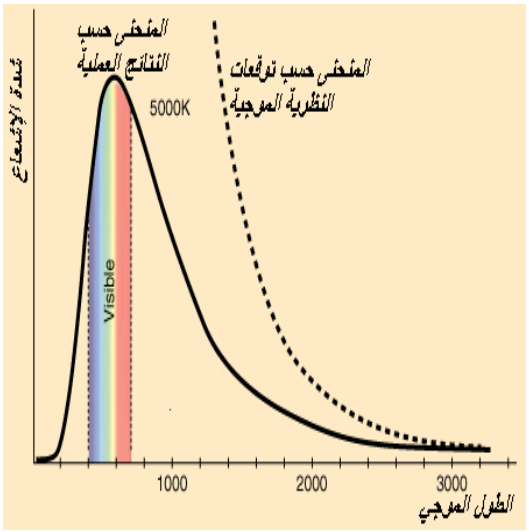
الشكل المقابل يوضح النتائج العملية التي حصل عليها العلماء للإشعاع المنبعث من الجسم الساخن عند ثلاثة درجات حرارة مختلفة . ويدرس المنحنى العلاقة بين شدة الإشعاع المنبعث من الجسم الساخن (المحور الصادي) والطول الموجي لهذا الإشعاع (المحور السيني)



ICS Genius

ومن خلال هذا المنحنى نستطيع استخلاص الملاحظات التالية :

- المساحة تحت المنحنى توضح الطاقة الإجمالية المنبعثة بالنسبة لوحدة المساحة .
- كلما زادت درجة الحرارة كلما زادت المساحة تحت المنحنى أي يزداد مقدار الطاقة الإجمالية لوحدة المساحة المنبعثة من الجسم الساخن .
- ينزاح الطول الموجي لقمة المنحنى تدريجياً نحو اليسار (أي باتجاه الطول الموجي الأقل والتردد الأعلى) بزيادة درجة الحرارة.
- كلما اقترب الطول الموجي من الصفر تقترب شدة الإشعاع المنبعث أيضاً من الصفر .



* مقارنة بين توقعات النظرية الموجية والنتائج العلمية لمنحنى إشعاع الجسم الأسود :

من خلال المقارنة نجد أن الجزء الأيمن من المنحنى (عند الأطوال الموجية الكبيرة) يتفق مع توقعات النظرية الموجية حيث نجد إنه كلما قل الطول الموجي (التردد يزداد) كلما زادت شدة الإشعاع المنبعث من الجسم الأسود , إلا أن الجزء الأيسر من المنحنى (عند الأطوال الموجية القصيرة) لم يتفق مع توقعات النظرية الموجية حيث أننا نجد أنه عندما يقترب الطول الموجي للإشعاع من الصفر تقترب شدة الإشعاع أيضاً من الصفر وقد جاء معاكساً لتوقعات النظرية الموجية حيث كانت تتوقع وكما ذكرنا سابقاً أنه كلما اقترب الطول الموجي للإشعاع م الصفر فإن شدة الإشعاع تقترب من ما لانهاية . وهنا قد وجد الفيزيائيون صعوبة كبيرة في تفسير لماذا كلما أقترب الطول الموجي من الصفر تقترب شدة الإشعاع أيضاً من الصفر ؟!

● نظرية الكـــم :

في أواخر العام (1900م) تمكن العالم الألماني ماكس بلانك من وضع تفسيراً لمنحنى إشعاع الجسم الأسود لم يكن معقولاً ولا مقبولاً في ذلك الوقت , يتناقض تماماً مع الفيزياء الموجية وكان تبريره الوحيد في تقديم هذا التفسير هو إنه يعطي الجواب الصحيح ، فقد افترض بلانك في تفسيره :

☜ الطاقة المنبعثة أو الإشعاع المنبعث من الجسم الأسود لا تنبعث بصورة مستمرة ولكنها مكماة أي على هيئة كميات محددة من الطاقة يطلق عليها الكمة وتتناسب طاقة الكمة (E) مع تردد الإشعاع الصادر (f) تناسباً طرديا

$$E \propto f$$

وأقل قيمة لطاقة الكمة تساوي :

$$E = h.f$$

حيث أن :

$h = 6.626 \times 10^{-34}\ J.s$ (ثابت بلانك)

ويمكن أن تمتلك الكمة قيم أعلى للطاقة تساوي مضاعفات صحيحة لأقل قيمة لطاقة الكمة , أي أن :

Physics Genius

$$E = n\,h.f$$

حيث أن :

$n = 1, 2, 3, 4, 5, \ldots$ (العدد الكمي أو الحالة الكمية)

○ وحدة قياس طاقة الكمة هي الجول (J) ولكن نظراً لأن هذه الوحدة تعتبر كبيرة مقارنةً بمقدار طاقة الكمة فلقد تم اشتقاق وحدة اخرى تسمى الإلكترون فولت (eV) للتعبير عنها , حيث أن :

$$1\ eV = 1.6 \times 10^{-19}\ J$$

* **تفسير بلانك لمنحنى إشعاع الجسم الأسود :**

ينبعث الإشعاع من الجسم الأسود نتيجة لاهتزاز ذراته على شكل كميات محددة من الطاقة ' وعند درجة حرارة معينة تهتز الذرات بترددات مختلفة ويقل عدد الذرات المهتزة كلما زاد التردد بينما تهتز معظم الذرات بترددات متوسطة (عند قمة المنحنى) ويكون عدد الذرات المهتزة بترددات منخفضة قليل وهذا ما يفسر نقصان شدة الإشعاع على يمين ويسار المنحنى وارتفاعه عن المنتصف .

● **تعميم آينشتاين لمبدأ تكميم الطاقة :**

لم تمض أكثر من خمس سنوات على وضع بلانك لنظريته حتى استطاع آينشتاين أن يوسع من فكرة التكميم لتشمل جميع الموجات الكهرومغناطيسية وكانت كالتالي :

- يمكن لذرات الجسم المتذبذب أن تفقد أو تكتسب مقادير قليلة من الطاقة عندما تنتقل من حالة كمية إلى حالة كمية أخرى أعلى أو أقل , وأن مقدار ما تكتسبه أو تفقده من طاقة (ΔE) يساوي الفرق بين الحالتين الكميتين اللتان انتقلت خلالهما ، فإذا كانت الذرة في حالة كمية (n) وانتقلت إلى الحالة الكمية (m) فإن مقدار ما تفقده أو تكتسبه من طاقة يساوي :

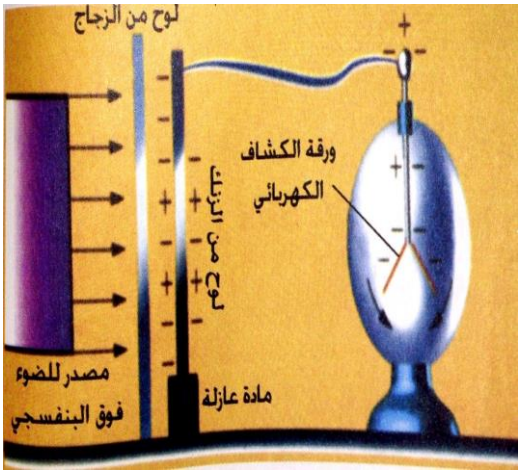
$$\Delta E = mhf - nhf$$

- الطاقة التي تكتسبها أو تفقدها ذرات الجسم المتذبذب تكون على هيئة موجات كهرومغناطيسية أي أن الإشعاع الكهرومغناطيسي لابد أن يكون على هيئة كمات ويطلق عليها بإسم الفوتونات أي أن طاقة الفوتون لابد أن تساوي :

$$E = h.f$$

Physics Genius

◄ ظاهرة التأثير الكهروضوئي :



جاء اكتشاف ظاهرة التأثير الكهروضوئي على يد العالم هيرتز عام (1887م) عندما كان عاكفاً في تجاربه لمحاولة إثبات النظرية الموجية لماكسويل فقد لاحظ هيرتز أنه عند تسليط ضوء على سطح فلز يتصل بقرص كشاف كهربائي فإنه قادر على اقتلاع الالكترونات من سطحه ، وقد استدل هيرتز على ذلك من خلال انفراج ورقتي الكشاف الكهربائي ، وسميت فيما بعد هذه الظاهرة بإسم (ظاهرة التأثير الكهروضوئي) .

● تعريف التأثير الكهروضوئي :

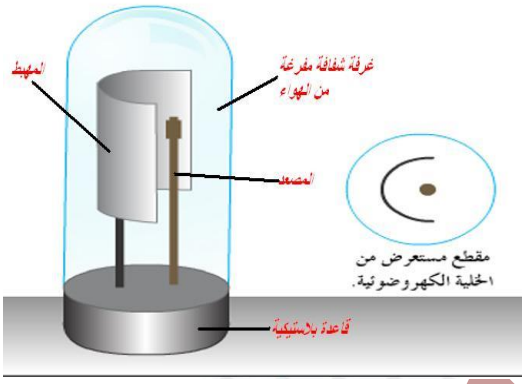
هي ظاهرة انبعاث الإلكترونات من أسطح الفلزات عند تسليط موجات كهرومغناطيسية مناسبة عليها .

كما ويطلق على الالكترونات المتحررة بفعل هذه الظاهرة بالإلكترونات الضوئية .

● تفسير الظاهرة :

* التجارب :

يوضح الشكل المقابل الجهاز المستخدم في تجارب تفسير الظاهرة وتعرف بإسم (الخلية الكهروضوئية) وهي تتكون من :



- قاعدة بلاستيكية تثبت عليها جميع محتويات الخلية .

- غرفة من الزجاج أو البلاستك الشفاف مفرغة من الهواء ومثبتة على القاعدة البلاستيكية .

- المهبط (الكاثود) : وهو عبارة عن نصف اسطوانة معدنية مطلية بطبقة من السيزيوم أو أحد العناصر الغنية بالالكترونات الحرة .

- المصعد (الآنود) : وهو عبارة عن قضيب أو سلك معدني يتمركز على محور الأسطوانة ويكون على هيئة سلك حتى لا يحجب الضوء عن المهبط وتسقط أكبر كمية ممكنة من الضوء عليه .

* توقعات النظرية الموجية على نتائج التجارب المتعلقة بالظاهرة :

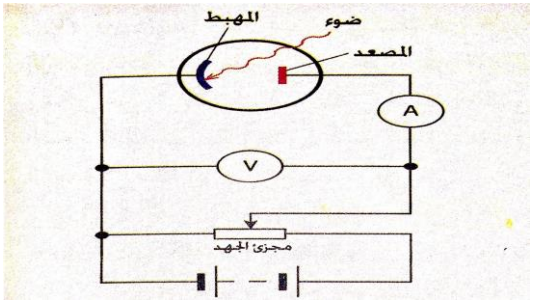
- تعتمد طاقة حركة الإلكترونات المتحررة على مدى تسخين الفلز وذلك يتم عن طريق تعريض سطح الفلز بشدة اضاءة , وبالتالي فإن تحرر الالكترونات يعتمد على شدة الإضاءة المسلطة .

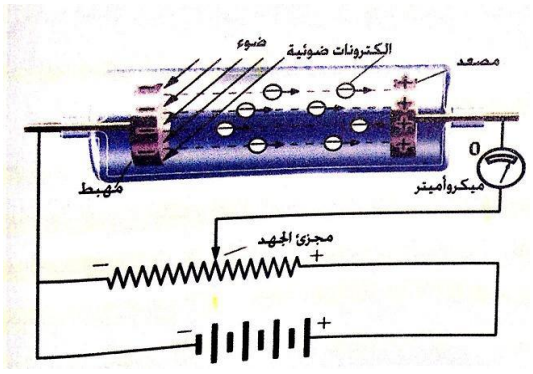
- تتوزع شدة الإضاءة على مساحة سطح الفلز بالتساوي وبالتالي فإنه يمكن لأي شدة إضاءة أن تعمل على تسخين سطح الفلز وبالتالي إكساب الإلكترونات طاقة حركة لتتحرر من سطح الفلز ويعتمد معدل التسخين على مقدار شدة الإضاءة فكلما كانت شدة الإضاءة عالية كلما كان معدل التسخين أعلى والعكس صحيح .

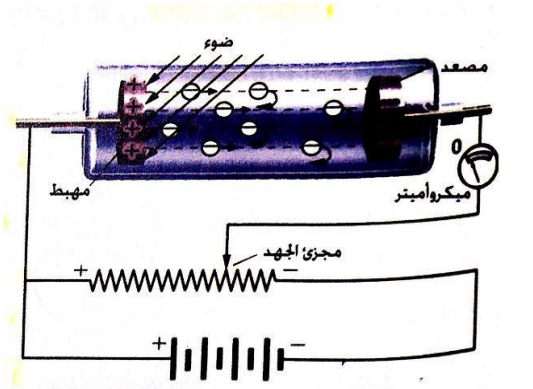
-لا تعتمد طاقة حركة الإلكترونات المتحررة على تردد الضوء الساقط وإنما على شدة الإضاءة المسلطة وفترة تسخين الفلز .

- بزيادة شدة الإضاء المسلطة على سطح الفلز يزداد عدد الإلكترونات المتحررة وكذلك طاقة حركتها .

Physics Genius







☜ التجربة الأولى / تحرير الإلكترونات من سطح الفلز :

فيها يوصل طرفا الخلية الكهروضوئية (المهبط والمصعد) بمصدر للجهد للكهربائي (البطارية) بحيث يوصل المهبط بالطرف السالب للبطارية والمصعد بالطرف الموجب للبطارية , وعند تسليط ضوء مناسب على سطح الفلز (المهبط) فإن الإلكترونات ستتحرر من السطح ويعمل المصعد على جذب الإلكترونات المتحررة إليه وينتج عن ذلك مرور تيار كهربائي في الدائرة نلاحظه في قراءة الأميتر .

♦ الملاحظات :

- الإلكترونات المتحررة لا تمتلك نفس السرعة أثناء الإنبعاث من المهبط إلى المصعد وبالتالي لا تمتلك نفس المقدار من طاقة الحركة .
- بزيادة جهد المصعد تزداد شدة التيار تدريجياً إلى أن تصل إلى قيمة معينة تثبت عندها شدة التيار .

☜ التجربة الثانية / حساب طاقة حركة أسرع الإلكترونات :

نستطيع حساب طاقة حركة أسرعة عن طريق عكس توصيل كلاً من المهبط والمصعد بالنسبة للبطارية , حيث يوصل المصعد بالقطب السالب للبطارية والمهبط بالقطب الموجب للبطارية وبالتالي فإنه عند تسليط ضوء على سطح الفلز وتتحرر الإلكترونات من السطح فإن المصعد سوف يتنافر مع الإلكترونات ويؤثر عليها بجهد عكسي يعمل على ممانعة وصول الإلكترونات إليه وبالتالي فإن معظم الإلكترونات سترتد ولا تصل إلى المصعد إلا عدداً قبل منها والتي تمتلك أعلى طاقة حركة ولكن عند زيادة فرق الجهد تدريجياً فإن هذا الجهد سيمنع هذه الإلكترونات من الوصول إلى المصعد وعندها يسمى الجهد الذي يمنع وصول الإلكترونات التي تمتلك أكبر طاقة حركة من الوصول إلى المصعد بجهد الإيقاف ويرمز له بالرمز (V_o) , ويعرف بأنه :

((أقل جهد سالب يستطيع إيقاف الإلكترونات التي تمتلك أقصى طاقة حركة من الوصول إلى المصعد))

في هذه التجربة نجد أن الإلكترونات عندما تكون على سطح المهبط فإنها تمتلك أعلى طاقة حركة (KE_{max}) ومقدارها يساوي :

$$KE_i = KE_{max}$$

في حين أن طاقة وضعها الكهربائية (PE) تسايو :

$$PE_i = 0$$

أقل جهد يستطيع إيقاف أسرع الإلكترونات يمكن الحصول عليه عندما تكون الإلكترونات عند سطح المصعد وعنده تكون طاقة حركة الإلكترونات تساوي:

$$KE_f = 0$$

أما طاقة وضعها الكهربائية فتصبح أكبر ما يمكن وتساوي :

$$PE_f = e.V_o$$

وبتطبيق مبدأ حفظ كالطاقة على النظام نجد أن :

Physics Genius

$$\Delta KE = -\Delta PE$$
$$KE_f - KE_i = -(PE_f - PE_i)$$
$$0 - KE_{max} = -(e.V_o - 0)$$
$$-KE_{max} = -e.V_o$$

ومنها نحصل على :

$$KE_{max} = e.V_o$$

حيث أن :

e شحنة الإلكترون وتساوي $(1.6 \times 10^{-19} C)$

☜ التجربة الثالثة / إعادة التجربة الأولى مع تثبيت شدة الإضاءة وتغيير كلاً من تردد الضوء الساقط ونوع الفلز المستخدم :

في هذه التجربة نعيد توصي كلاً من المهبط بالقطب السالب للبطارية والمصعد بالقطب الموجب للبطارية ونقوم بتسليط الضوء على سطح فلزٍ ما ونقوم بتغيير تردد الضوء الساقط تدريجياً مع ثبات شدة الإضاءة ، ثم نغير نوع الفلز المستخدم ونعيد الكرة من جديد وهكذا .

♦ الملاحظات :

- ليس جميع الترددات لها القدرة على تحرير الإلكترونات الضوئية من سطح الفلز .
- هناك قيمة معينة للتردد يبدأ عندها الإنبعاث الكهروضوئي حيث أنه أقل من هذه القيمة لا يحدث إنبعاث وأعلى من هذه القيمة يحدث الإنبعاث الكهروضوئي .
- تتغير هذه القيمة مع تغير نوع الفلز المستخدم .
- يحدث الإنبعاث الكهروضوئي لحظياً بمجرد سقوط الضوء بتردد أعلى من أقل قيمة للتردد لهذا الفلز مهما كانت شدة الإضاءة .

☜ التجربة الرابعة / نثبت نوع الفلز المستخدم ونغير كلاً من تردد الضوء الساقط وشدة الإضاءة :

♦ الملاحظات :

- كلما زاد تردد الضوء الساقط كلما زادت سرعة الإلكترونات الضوئية أي تزداد طاقة حركتها .
- لا تتغير سرعة الإلكترونات المتحررة بزيادة شدة الإضاءة المسلطة .
- عند زيادة شدة الإضاءة فإن عدد الإلكترونات الضوئية يزداد وتزداد قراءة الأميتر (شدة التيار تزداد).
- عندما يكون تردد الضوء غير مناسب (أقل من أقل قيمة للتردد المناسب للإنبعاث) فإنه مهما كانت شدة الإضاءة المسلطة ومهما كانت الفترة الزمنية فإنه لن يحدث إنبعاث كهروضوئي .

Physics Genius

☜ التجربة الخامسة / إعادة التجربة الثانية مع تغيير كل من تردد الضوء الساقط ونوع الفلز وتثبيت شدة الإضاءة المسلطة :

في هذه التجربة يكون المهبط متصلاً بالقطب الموجب للبطارية والمصعد بالقطب السالب للبطارية أن المصعد يسلط بجهد عكسي على الإلكترونات الضوئية المتحررة.

♦ الملاحظات :

- عند زيادة تردد الضوء الساقط وتثبيت نوع الفلز المستخدم يزداد جهد الإيقاف .
- بتغيير نوع الفلز وتثبيت تردد الضوء الساقط عند تردد معين ومناسب نجد أن جهد الإيقاف يتغير حسب نوع الفلز المستخدم .

* نتائج التجارب :

- الإلكترونات الضوئية لا تمتلك نفس المقدار من طاقة الحركة عند انبعاثها من سطح الفلز .
- طاقة حركة الإلكترونات المنبعثة لا تعتمد على شدة الإضاءة المسلطة وإنما على تردد الضوء الساقط .
- شدة التيار تعتمد على شدة الإضاءة المسلطة .
- ليس جميع الترددات لها القدرة على تحرير الإلكترونات الضوئية من سطح الفلزات حيث أنها يجب أن تكون أكبر من قيمة معينة من التردد تعتمد على نوع الفلز المستخدم .
- جهد الإيقاف يعتمد على كلاً من :
  1- تردد الضوء المستخدم .
  2- نوع الفلز المستخدم .

وبمقارنة نتائج التجارب مع توقعات النظرية الموجية , نجد أن التجارب جاءت مخالفة تماماً لما كانت تتوقعه النظرية الموجية وبالتالي نجد أنها فشلت في تفسير هذه الظاهرة إلى أن تمكن العالم آينشتاين في عام (1905م) من تقديم تفسير مقبول وناجح لهذه الظاهرية معتمداً فيه على نظرية الكم لبلانك .

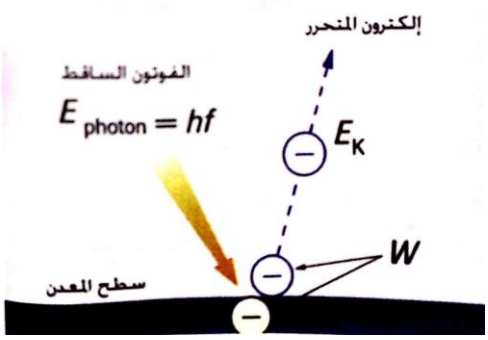
* تفسير آينشتاين لظاهرة التأثير الكهروضوئي :

كان تفسير آينشتاين للظاهرة الكهروضوئية يتضمن النقاط التالية :

- الضوء عبارة عن سيل من الفوتونات ويعتمد عدد الفوتونات على شدة الإضاءة أي أنه كلما زادت شدة الإضاءة كلما زاد عدد الفوتونات والعكس صحيح .
- كل فوتون يحمل طاقة مقدارها :

$$E = h.f$$

تعتمد على تردد الضوء الساقط , وبالتالي فإن عند الضوء أحادي اللون فإن جميع الفوتونات تحمل نفس المقدار من الطاقة مهما كانت شدة الإضاءة .



hysics Genius

- عند سقوط الضوء على سطح الفلز فإن الفوتونات سوف تسلك سلوك الجسيمات ويصطدم كل فوتون بإلكترون واحد فقط على سطح الفلز ، ونتيجة لهذا الإصطدام فغن الإلكترون سوف يمتص جميع الطاقة التي يحملها الفوتون وتصبح طاقة الإلكترون مساوية لطاقة الفوتون الذي قام بامتصاصه .

- يستخدم الإلكترون هذه الطاقة :

♦ أولاً / للتحرر من سطح الفلز ويعتمد مقدار هذه الطاقة على مدى ارتباط الإلكترون بالنواة في الفلز وتسمى هذه الطاقة بدالة الشغل ويرمز لها بالرمز (W_o) وتعرف بأنها :

((أقل طاقة للفوتون الساقط تلزم لتحرير الإلكترون من سطح الفلز دون إكسابه طاقة حركة)).

- أقل قيمة لتردد الفوتون الساقط التي تستطيع تحرير الإلكترون من سطح الفلز تسمى بتردد العتبة ويرمز لها بالرمز لها بالرمز (f_o)

- ويرتبط مقدار دالة الشغل بتردد العتبة من خلال العلاقة :

$$W_o = h.f_o$$

أي أن دالة الشغل تعتمد على نوع الفلز المستخدم .

♦ ثانياً / يستخدم الإلكترون جميع ما تبقى من الطاقة على هيئة أقصى طاقة حركة للانتقال من المهبط إلى المصعد (KE_{max}) .

ومنها يمكن القول أن :

$$E = KE_{max} + W_o \qquad \gg 1$$

وتعرف هذه المعادلة بمعادلة آينشتاين في التأثير الكهروضوئي .

- تختلف سرعة الإلكترونات المتحررة بسبب التصادمات التي تحدث بين الإلكترونات مع بعضها البعض ونتيجة لهذه التصادمات تفقد الإلكترونات جزءاً من طاقتها فتقل سرعتها وبالتالي فإن الإلكترونات التي تمتلك أكبر سرعة هي الإلكترونات التي خرجت بأقل عدد من التصادمات .

- بزيادة شدة الإضاءة فإن عدد الفوتونات تزداد ونظراً لأن كل فوتون يتعامل مع إلكترون واحد فقط فإن عدد الإلكترونات المتحررة سوف يزداد وهذا ما يفسر زيادة شدة التيار بزيادة شدة الإضاءة .

● استنتاجات حول معادلة آينشتاين :

* الاستنتاج الأول :

يمكن كتابة معادلة آينشتاين بالصورة التالية :

$$KE_{max} = E - W_o \qquad \gg 2$$

ومنها يمكن القول أن :

$$KE_{max} = h.f - h.f_o \qquad \gg 3$$

ومن خلال المعادلتين 2 و 3 نستنتج أن :

☜ إذا كان ($f > f_o$) فإن :

$$E > W_o$$

Physics Genius

وعندها فإن الفوتون يصبح قادراً على تحرير الإلكترونات بحيث يتبقى جزءاً من الطاقة تستخدمه الإلكترونات على هيئة طاقة حركة قصوى .

☜ إذا كان $(f < f_o)$ فإن :

$$E < W_o$$

وعندها تكون طاقة الفوتون أقل من الطاقة التي يحتاجها الإلكترون حتى يتحرر من سطح الفلز وبالتالي لن يحدث إنبعاث كهروضوئي .

☜ إذا كان $(f = f_o)$ فإن :

$$E = W_o$$

أي أن الطاقة التي يكتسبها الإلكترون من الفوتون تكفي فقط لتحرير الإلكترون من سطح الفلز ولكن دون إكسابه أي طاقة حركة .

* الاستنتاج الثاني :

عند النظر إلى معادلة آينشتاين :

$$KE_{max} = h.f - W_o \quad \gg 4$$

فنجد أنها تشبه معادلة خط مستقيم من الدرجة الأولى كما يلي :

$$y = mx - c$$

حيث أن :

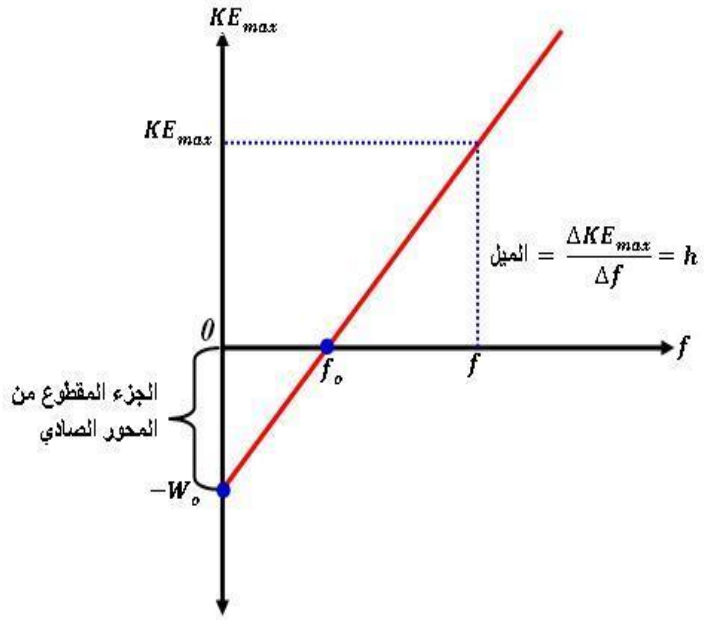
$y \rightarrow KE_{max}$ (المحور الصادي)

$m \rightarrow h$ (الميل)

$x \rightarrow f$ (المحور السيني)

$-c \rightarrow -W_o$ (الجزء المقطوع من محور الصادات)

وبالتالي فإنه يمكن تمثيلها بيانياً كما يلي :



Physics Genius

نعلم أن :

$$c = \lambda . f$$

وبالتالي فإن :

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

ومنه يمكن التعويض عن تردد العتبة كما يلي :

$$f_o = \frac{c}{\lambda_o}$$

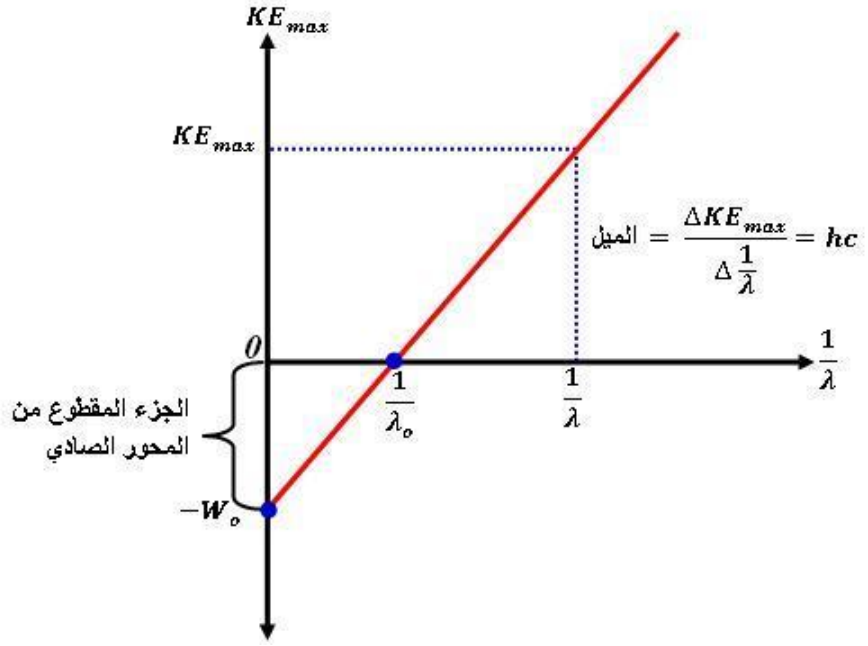
حيث أن :

λ_o ← يسمى بالطول الموجي الحرج أو العتبة وهو أبر طول موجي للضوء الساقط يستطيع أن يحرر الإلكترونات من سطح الفلز دون إكسابه طاقة حركة .

وعند التعويض عن مقدار f في المعادلة رقم 4 نحصل على :

$$KE_{max} = h.c\frac{1}{\lambda} - W_o$$

وبالتالي فإنه يمكن تمثيل هذه المعادلة بيانياً كما يلي :



نعلم أيضاً أن :

$$KE_{max} = e.V_o$$

وبالتعويض عن طاقة الحركة القصوى في المعادلة رقم 4 نحصل على :

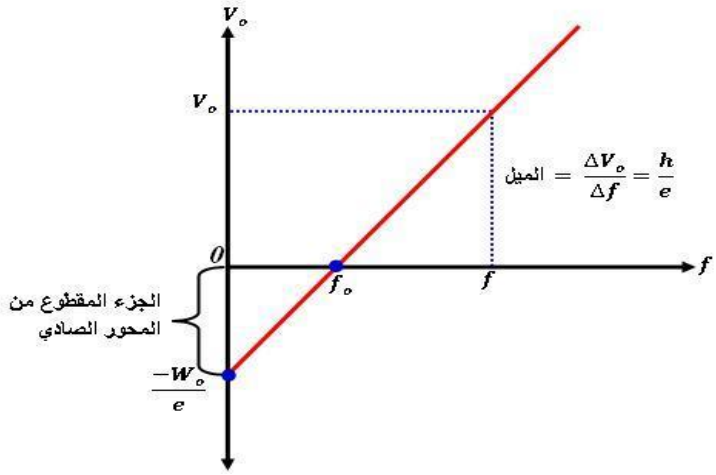
$$e.V_o = h.f - W_o$$

وبقسمة الطرفين على e نحصل على :

$$V_o = \frac{h}{e}.f - \frac{W_o}{e}$$

وبالتالي أيضاً يمكن تمثيل هذه المعادلة بيانياً بحيث يكون جهد الإيقاف في المحور الصادي وتردد الضوء الساقط في المحور السيني كما يلي :

Physicus



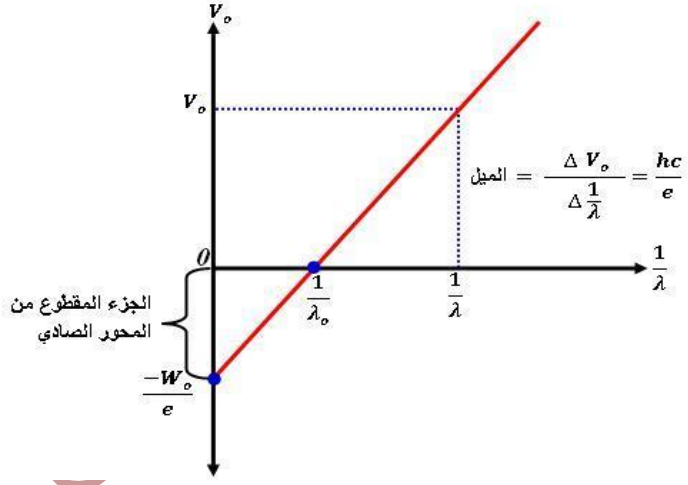
وكذلك عند التعويض عن تردد الضوء الساقط بالمقدار :

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

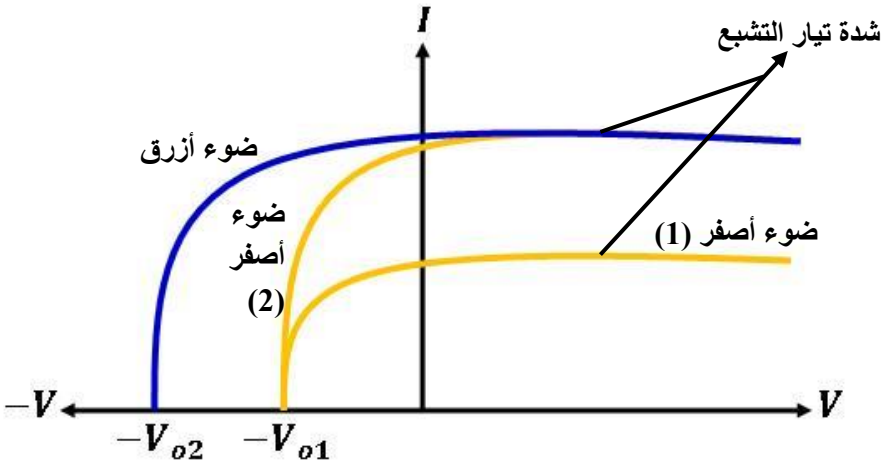
تصبح المعادلة الأخيرة كما يلي :

$$V_o = \frac{hc}{e}.\frac{1}{\lambda} - \frac{W_o}{e}$$

وعند تمثيلها بيانياً نحصل على :



- تمثيل العلاقة بين جهد المصعد وشدة التيار المار في الخلية الكهروضوئية:



Phy-Genius

من خلال المنحنى نلاحظ ما يلي :

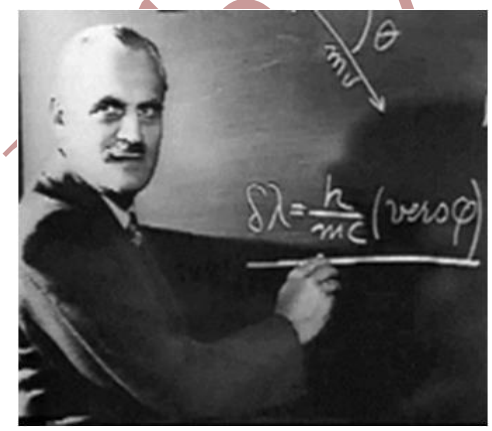
- جهد الإيقاف (V_{o1}) للضوء الأصفر (1) هو نفسه للضوء الأصفر (2) وذلك لأن الضوئين لهما نفس التردد (تردد اللون الأصفر) حيث أن جهد الإيقاف يعتمد على تردد الضوء الساقط .
- جهد الإيقاف (V_{o2}) للضوء الأزرق أكبر من جهد الإيقاف (V_{o1}) للضوء الأصفر , هذا يعني أن تردد الضوء الأزرق أكبر من تردد الضوء الأصفر حيث أنه بزيادة التردد تزداد طاقة حركة الإلكترونات المنبعثة وبالتالي فإن الجهد اللازم لإيقافها سوف يزداد .
- بزيادة الجهد الموجب للمصعد تزداد شدة التيار المار في الخلية إلى أن تصل إلى مرحلة تثبت عندها شدة التيار وتعرف بشدة تيار التشبع .
- شدة التيار للضوء الأصفر (1) أقل من شدة التيار للضوء الأصفر (2) بالرغم من أنهما يمتلكان نفس التردد والسبب في ذلك أن شدة إضاءة الضوء الأصفر (1) أقل من شدة إضاءة الضوء الأصفر (2) .
- شدة التيار للضوء الأزرق تساوي شدة التيار للضوء الأصفر (2) بالرغم من أن لهما ترددان مختلفان وذلك لأن شدة إضاءة الضوء الأصفر (2) تساوي شدة إضاءة الضوء الأزرق .

◄ التطبيقات العملية على ظاهرة التأثير الكهروضوئية :

من أهم الأجهزة التي يعتمد عملها على ظاهرة التأثير الكهروضوئي نذكر منها :

- الوصلة الثنائية الضوئية .
- جهاز التنبيه ضد السرقة .
- البوابات الإلكترونية .
- أجهزة التحكم عن بعد .
- جهاز كاشف الدخان .

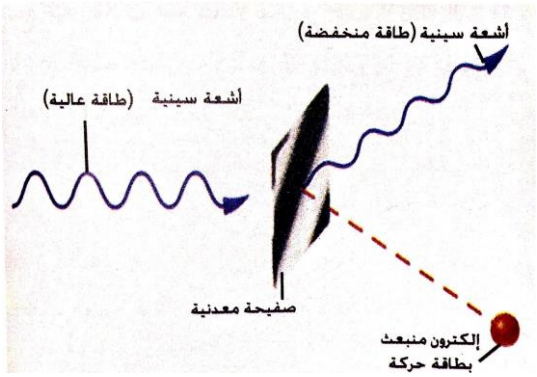
◄ تأثير كومبتون :



(إذا كان كلا من الضوء والأشعة السينية (x-ray) عبارة عن موجات كهرومغناطيسية فلابد أن ينطبق مفهوم الفوتون أيضاً عليها) هذا الافتراض الذي افترضه العالم الفيزيائي الأمريكي آرثر كومبتون عند دراسته لتشتت الأشعة السينية بواسطة صفيحة رقيقة من الجرافيت .

فقد لاحظ كومبتون أنه عند سقوط الأشعة السينية ذات الطول الموجي الموحد على سطح صفيحة من الجرافيت فإنها تتشتت وتنحرف عن مسارها الأصلي بزاوية معينة ويرافقها إنطلاق إلكترون بطاقة حركة ، وعند حساب التردد والطول الموجي للأشعة المتشتتة وجد كومبتون أن

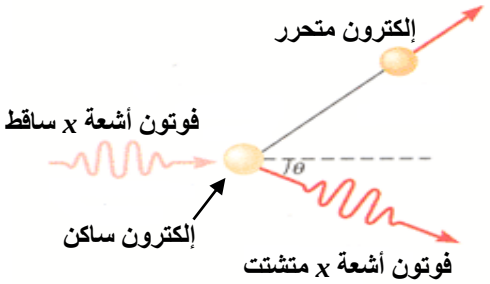
Physics Genius



ترددها أقل من تردد الأشعة السينية الساقطة وطولها الموجي أكبر من الطول الموجي للأشعة الساقطة سميت فيما بعد هذه الظاهرة بإسم (تأثير كومبتون).

حاول كومبتون تفسير هذه الظاهرة باستخدام النظرية الموجية ولكنه فشل وذلك لأنه لم يجد التفسير المقبول في الإجابة على التساؤل (لماذا يتغير الطول الموجي للأشعة المتشتتة عند اصطدامها بسطح الصفيحة ؟!)

لجأ بعد ذلك كومبتون إلى نظرية الكم وبها طرح افتراضه وهو إذا كان الضوء والأشعة السينية عبارة عن موجات كهرومغناطيسية وبالتالي فإنه لابد وأن ينطبق مفهوم الفوتون على كل منهما ويمكن للأشعة السينية مثلها مثل الضوء أن تسلك سلوك الجسيمات وأن نوعاً من التصادم المرن يحدث بين فوتونات الأشعة السينية وإلكترونات ذرات الصفيحة مثل تصادم كرات البليارد , ونتيجة لهذا التصادم فإن فوتون الأشعة السينية الساقطة يعطي جزءاً من طاقته وكمية تحركه إلى الإلكترون الذي يستخدمها للتحرر من سطح الصفيحة والانطلاق بأقصى طاقة حركة ممكنة له ، في حين أن الفوتون سيتشتت بزاوية مقدارها (θ) عن المسار الأصلي لفوتون الأشعة السينية الساقطة بطاقة أقل من طاقة الفوتون الساقط وطول موجي أكبر .



ونظراً لذلك فإنه لابد وأن ينطبق مبدأي حفظ الطاقة وحفظ كمية التحرك على هذا التصادم .

● **تطبيق مبدأ حفظ الطاقة :**

ينص قانون حفظ الطاقة في التصادم المرن على أن :

(الطاقة الكلية للنظام قبل التصادم لابد وأن تساوي الطاقة الكلية للنظام بعد التصادم)

النظام لدينا يتكون من فوتون وإلكترون ومنها يمكن القول أن:

E_{photon} ← طاقة فوتون الأشعة السينية قبل التصادم .

E'_{photon} ← طاقة فوتون الأشعة السينية بعد التصادم .

$E_{electron}$ ← طاقة الإلكترون قبل التصادم وبافتراض أنها مهملة بسبب ارتباط الإلكترون بالنواة قبل التصادم فإننا سنعتبرها تساوي صفر .

$E'_{electron}$ ← طاقة الإلكترون بعد التصادم وتكون على هيئة طاقة حركة قصوى(KE_{max}) .

وعليه فإن :

$$E_{photon} + E_{electron} = E'_{photon} + E'_{electron}$$

$$\therefore E_{photon} + 0 = E'_{photon} + KE_{max}$$

نعلم أن :

$$E = h.f$$

ومنها إذاً :

$$h.f = h.f' + \frac{1}{2} m_e.v_{max}^2$$

Physics Genius

● تطبيق مبدأ حفظ كمية التحرك :

ينص مبدأ حفظ كمية التحرك على أن (كمية التحرك للنظام قبل التصادم لابد وأن تساوي كمية التحرك للنظام بعد التصادم)

ومنها إذا افترضنا أن :

P_{photon} ← كمية تحرك الفوتون قبل التصادم .

P'_{photon} ← كمية تحرك الفوتون بعد التصادم .

$P_{electron}$ ← كمية تحرك الإلكترون قبل التصادم وبافتراض أن الإلكترون قبل التصادم كان في حالة سكون (مرتبط بالنواة) فإن كمية تحركه قبل التصادم ستساوي صفراً .

$P'_{electron}$ ← كمية تحرك الإلكترون بعد التصادم .

وبالتالي يمكن القول أن :

$$P_{photon} + P_{electron} = P'_{photon} + P'_{electron}$$

$$\therefore P_{photon} + 0 = P'_{photon} + P'_{electron}$$

$$\therefore P_{photon} = P'_{photon} + P'_{electron} \quad \gg 1$$

نعلم أن :

$$P = m.v$$

♦ حساب كمية تحرك الفوتون :

نعلم أن الفوتون يتحرك بسرعة الضوء (c) وبالتالي فإن كمية تحركه تساوي :

$$P_{photon} = m_{photon}.c$$

ـ كيف نحسب كتلة الفوتون مع العلم أن الفوتون عبارة عن طاقة وأن كتلته السكونية تساوي صفراً ؟!

استطاع كومبتون من حساب كتلة الفوتون بالتعويض عنها في مبدأ تكافؤ الكتلة والطاقة لآينشتاين كما يلي :

$$E = m.c^2$$

ومنها فإن:

$$E_{photon} = m_{photon}.c^2$$

ومنها نحصل على :

$$m_{photon} = \frac{E_{photon}}{c^2}$$

وبالتعويض في قانون كمية تحرك الفوتون نحصل على :

$$P_{photon} = \frac{E_{photon}}{c^2}.c$$

$$\therefore \quad P_{photon} = \frac{E_{photon}}{c}$$

نعلم أن :

Physics Genius

$$E = \frac{h.c}{\lambda}$$

ومنها إذاً :

$$P_{photon} = \frac{h.c}{\lambda.c}$$

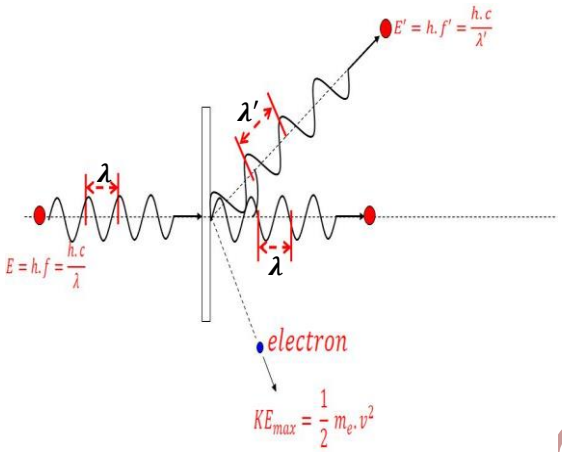
$$\therefore \quad P_{photon} = \frac{h}{\lambda}$$

وبالتعويض في المعادلة (1) نحصل على :

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} + m_e.v_{max}$$

أو :

$$\frac{E}{c} = \frac{E'}{c} + m_e.v_{max}$$



♦ حساب التغير في الطول الموجي للفوتون :

استطاع كومبتون استنتاج أن مقدار التغير في الطول الموجي للفوتون الساقط والمتشتت يعتمد على مقدار زاوية إنحراف الفوتون المتشتت عن المسار الأصلي للفوتون الساقط من خلال العلاقة :

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e.c}(1 - cos\theta)$$

حيث أن :

$\frac{h}{m_e.c}$ ← مقدار ثابت ويسمى الطول الموجي لكومبتون ويساوي ($2.43 \times 10^{-12}\ m$)

Physics Genius